

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 539.4.019.3

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.006

## ОБЗОР ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Дина Ураловна Абдуллина<sup>1</sup>, Юрий Владимирович Бебихов<sup>2</sup>, Павел Семенович Татаринov<sup>3</sup>,  
Сергей Владимирович Дмитриев<sup>4†</sup>

<sup>1, 4</sup> Институт физики молекул и кристаллов, Уфимский федеральный исследовательский центр РАН, пр. Октября, 71, 450054, Уфа, Россия

<sup>2, 3, 4</sup> Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Мирном, ул. Тихонова, 5/1, 678170, Мирный, Россия

<sup>1</sup> dina.abdullina25@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6196-6093>

<sup>2</sup> bebikhov.yura@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8366-4819>

<sup>3</sup> ps.tatarinov@s-vfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7430-8591>

<sup>4</sup> dmitriev.sergey.v@gmail.com<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-6744-4445>

**Аннотация.** Технология электропластической обработки металлов давлением (ЭОМД) – это относительно новый процесс формоизменения металлов, который является энергоэффективным, экологически чистым и универсальным. В частности, он может быть использован для обработки металлов или сплавов, которые трудно обрабатывать с помощью обычных производственных процессов. Эффект электропластичности был открыт советскими учеными, но в настоящее время Россия утратила первенство в его практическом применении. В настоящее время во всех технологически развитых странах ведутся активные научные исследования и технологические разработки в области ЭОМД. В России несколько активных групп работают с целью сокращения наметившегося отставания. Практическая целесообразность использования эффекта электропластичности в ОМД ни у кого не вызывает сомнения, в то же время, признаётся, что физические механизмы реализации данного эффекта остаются не до конца понятыми и продолжают активно обсуждаться. Дискутируются такие конкурирующие идеи как электронный ветер и неомогенное выделение джоулева тепла, рассматривается влияние скин- и пинч-эффектов. За последнее десятилетие в ЭОМД были достигнуты значительные успехи, и в этом обзоре обобщается текущее состояние проблемы, и описываются последние разработки в области ЭОМД. Особый акцент сделан на описании механизмов, ответственных за электропластический эффект и эволюции микроструктуры металлов и сплавов, подвергнутых такой обработке. Также обсуждаются проблемы, стоящие перед теоретиками и экспериментаторами, для повышения эффективности процессов ЭОМД. Делается прогноз эффективности использования ЭОМД на предприятиях мелкого и среднего металлургического передела.

**Ключевые слова:** обработка металлов давлением, электропластический эффект, дефекты кристаллической структуры, электронный ветер, неомогенное выделение джоулева тепла, скин-эффект, пинч-эффект.

**Благодарности:** Работа была поддержана грантом Российского научного фонда, грант № 22-22-00810.

---

**Для цитирования:** Абдуллина Д.У., Бебихов Ю.В., Татаринov П.С., Дмитриев С.В. Обзор последних достижений в области электропластической обработки металлов давлением // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 4. С. 469–483. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.006.

---

Original article

## REVIEW OF RECENT ACHIEVEMENTS IN THE FIELD OF ELECTROPLASTIC METAL FORMING

Dina U. Abdullina<sup>1</sup>, Yurii V. Bebikhov<sup>2</sup>, Pavel S. Tatarinov<sup>3</sup>, Sergey V. Dmitriev<sup>4†</sup><sup>1,4</sup>Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Centre of RAS, Oktyabrskaya Pr., 71, Ufa, 450054, Russia<sup>2, 3, 4</sup>Mirny Polytechnic Institute (branch) of North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, Tihonov Str., 5/1, Mirny, 678170, Russia<sup>1</sup>dina.abdullina25@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6196-6093><sup>2</sup>bebikhov.yura@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8366-4819><sup>3</sup>ps.tatarinov@s-vfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7430-8591><sup>4</sup>dmitriev.sergey.v@gmail.com<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-6744-4445>

**Abstract.** Electroplastic metal forming (EMF) technology is a relatively new metal forming process that is energy efficient, environmentally friendly, and versatile. In particular, it can be used to process metals or alloys that are difficult to process using conventional manufacturing processes. The effect of electroplasticity was discovered by Soviet scientists, but at present Russia has lost its primacy in its practical application. Currently, in all technologically advanced countries, active research and technological developments in the field of EMF are being carried out. In Russia, several active groups are working to close the emerging gap. The practical expediency of using the effect of electroplasticity in metal forming is beyond doubt, at the same time, it is recognized that the physical mechanisms for implementing this effect remain not fully understood and continue to be actively discussed. Competing ideas such as the electron wind and inhomogeneous Joule heat release continue to be discussed, and the influence of skin and pinch effects is considered. Significant advances have been made in EMF over the past decade and this review summarizes the current state of the problem and describes recent developments in EMF. Particular emphasis is placed on the description of the mechanisms responsible for the electroplastic effect and the evolution of the microstructure of metals and alloys subjected to such treatment. Also discussed are the problems facing theorists and experimenters to improve the efficiency of EMF processes. A forecast is made of the efficiency of using EMF at enterprises of small and medium-sized metallurgical processing.

**Keywords:** metal forming, electroplastic effect, crystal structure defects, electron wind, inhomogeneous release of Joule heat, skin effect, pinch effect.

**Acknowledgements:** The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation, grant No. 22-22-00810.

**For citation:** Abdullina, D. U., Bebikhov, Yu. V., Tatarinov, P. S. & Dmitriev, S. V. (2023). Review of recent achievements in the field of electroplastic metal forming. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(4), 469–483. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.006.

## Введение

Пропускание электрических импульсов через металлы в процессе их деформации резко снижает напряжение течения и значительно повышает пластичность. Влияние импульсов электрического тока на пластическое течение металлов называется электропластическим эффектом (ЭПЭ). Впервые ЭПЭ был обнаружен Троицким и Лихтманом в 1963 году [1]. Впоследствии Троицкий [2–14] и другие советские исследователи [15–32], а также Конрад [33–42] и другие американские ученые [43–46] провели серию обширных исследований влияния дрейфа электронов на напряжение течения различных металлов. Обеспечение дрейфа электронов

в эти исследования проводилось двумя способами, а именно, приложением постоянного электрического тока и электрических импульсов высокой плотности ( $10^3$ – $10^5$  А/см<sup>2</sup>), длительностью 100 мкс. Кроме того, эти работы были сосредоточены на изучении механизма ЭПЭ с использованием трех типов механических испытаний, а именно одноосного растяжения, ползучести и релаксации напряжений.

Традиционные производственные процессы, такие как волочение, прокатка и штамповка, основаны на использовании тепла для уменьшения усилий, необходимых для изготовления деталей. Самые большие затраты времени, энергии и рабочей силы происходят на многочисленных стадиях предварительного

нагрева, промежуточного нагрева и отжига. Более того, температуры, требуемые для этого процесса, обычно довольно высокие, что потенциально приводит к термическому напряжению, деформации и снижению контроля допусков. Таким образом, ЭПЭ является одним из наиболее эффективных способов упрощения производственных процессов при одновременном улучшении свойств конечной продукции. Лучшее понимание влияния электрического тока на эволюцию микроструктуры металлов в процессе производства важны как для науки, так и для техники. Цель данной статьи - обобщить основные достижения последних лет в области ЭПЭ и электропластической обработки металлов давлением (ЭОМД) металлов и охватывает как экспериментальные, так и теоретические работы.

### 1. Новаторские исследования в области электропластичности

В 1963 году Троицкий и Лихтман [1] сообщили, что импульсы электрического тока уменьшают напряжение, необходимое для инициирования деформации в металлах. При электронном облучении монокристаллов Zn, подвергающихся пластической деформации, наблюдалось значительное снижение напряжения текучести и повышение пластичности, если электронный пучок был направлен вдоль плоскости скольжения (0001) по сравнению с тем, когда он был перпендикулярен этой плоскости. Впоследствии это явление было подтверждено Троицким [47] и привело его к выводу, что дрейфующие электроны могут оказывать силовое воздействие ("электронный ветер") на дислокации, и такая сила должна возникать при прохождении электрического тока через пластически деформируемый металл.

С тех пор по этой теме было проведено большое количество работ. Троицкий и другие советские ученые провели серию исследований влияния импульсов постоянного тока на механические свойства металлов, включая напряжение течения [2-7], релаксацию напряжений [8-11], ползучесть [12-14], образование и подвижность дислокаций [15,16], хрупкое разрушение [17-19], усталость [20], и на металлообработку [21-32]. Пионерские работы, относящиеся к ЭПЭ, начатые в России, были продолжены в Соединенных Штатах Конрадом и коллегами [33-39], Вармой и Корнуэллом [43], а также Голдманом и др.[44]. Конрад и коллеги провели эксперименты по определению величины

дрейфового электронно-дислокационного взаимодействия при воздействии импульса тока во время пластического течения и по анализу физической природы данного взаимодействия. Был сделан вывод, что наблюдаемый эффект частично обусловлен увеличением плотности подвижных дислокаций и площади, выметаемой дислокациями при их успешной тепловой флуктуации. Работа в основном была сосредоточена на влиянии импульсов электрического тока на одноосное растяжение металлов.

Андравес и соавторы сообщили, что электрообработка повлияла на прочность и пластичность алюминия 6061 T6511 [48]. Они дополнили исследование изучением изменения в микроструктуре растягиваемых образцов 6061 T6511 после электростимулированной деформации. Росс и Рот также всесторонне исследовали воздействие электричества на различные материалы [49]. Эта работа показала, что электропластический эффект наблюдался в большинстве материалов независимо от микроструктуры, удельного сопротивления или прочности. Недавно Чжу и соавторы [50] изучили влияние электроимпульсной обработки на микроструктуру и удлинение сплава Zn-Al. По сравнению со сплавом, не обработанным электрическими импульсами, удлинение до разрыва сплава ЭП ZA22 увеличилось на 437 % при температуре 28 °C, и при электроимпульсном воздействии наблюдалась высокая скорость деформации. Соответственно, представляется, что импульсы электрического тока обладают потенциалом снижения усилий, требуемых во время процессов объемной деформации. Кроме того, применение импульсов электрического тока во время деформации может увеличить обрабатываемость материалов и срок службы инструмента/штампа при одновременном уменьшении пружинения заготовки.

В [51] авторами был проведен эксперимент по электроимпульсной обработке нержавеющей стали 308L в процессе волочения. Изучено электроимпульсное воздействие по некоторым механическим параметрам, таким как сила волочения, кривые напряжение-деформация и эффективная энергия, необходимая для электрических импульсов различной конфигурации. В процессе волочения при пропускании импульсов тока через образец повышается формовость материала до 11,9 %, а также улучшилась относительная энергоэффективность процесса до 7,6 %. При анализе микроструктуры было показано, что электроимпульсы вызывают процесс динамической рекристаллизации и процесс раздвойнивания.

Авторами [52] проводилось исследование влияния обжатия за один проход на механические свойства, микроструктуру и эволюцию текстуры полос магниевого сплава Mg-3Al-1Zn, обработанного электропластической дифференциальной скоростной прокаткой. Механические свойства прокатанных полос повышаются с обжатием за один проход. Импульсы электрического тока оказывают сильное воздействие на эволюцию микроструктуры и текстуры, и способствуют динамической рекристаллизации.

### 1. Модели и механизмы электропластической деформации

Известно, что интенсивная пластическая деформация приводит к развитию полос локализованного сдвига, в которых присутствуют области с сильной кривизной решетки, нередко называемые ротациями. Высокочастотные электрические импульсы разделяют локализованные заряды в ротациях, релаксируя концентраторы напряжений и затрудняя развитие трещин. В работе авторов представлены процессы релаксации механических напряжений при пластической деформации стимулируемой импульсами тока высокой частоты [53].

Пластическая деформация малоуглеродистой стали была изучена методами инфракрасной термографии и двухэкспозиционной спеклинтерферометрии под действием импульсного электрического тока. В результате чего было установлено, что увеличение скорости пластических волн на 65 % происходит под действием внешнего электрического воздействия. Расщепление скоростей перемещений происходит благодаря воздействию электрического тока на подвижном и неподвижном концах образцов. Предполагается, что данное расщепление связано со штарковским расщеплением энергетических уровней деформируемой системы, и в результате происходит уменьшение потенциального барьера для движения дефектов кристаллической решетки. Наличие градиента температуры, выявленное посредством термографии, обнаружило несоответствия с характером распределения перемещений. В центральной области образца температура достигала 351 К, в то время как в области захватов – 330 К при первичной обработке импульсами тока большой мощности. Такое распределение температуры объясняется тем, что при частоте следования импульсов 10 Гц тепло не успевает рассеиваться. Наиболее быстрым каналом преобразования энергии электрического импульса

оказываются структурные изменения в деформируемой системе [54].

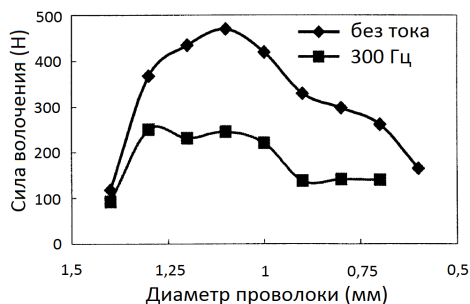
## 2. Производство на основе электропластического эффекта

Для уменьшения усилий, связанных с изготовлением деталей в традиционных производственных процессах, таких как волочение, прокатка и штамповка, используется нагрев. Технологии, основанные на горячей обработке, имеют негативные стороны, которых лишено производство на основе ЭПЭ, с точки зрения эффективности и энергосбережения [55, 56]. Российские исследователи уже внедрили этот процесс при вытяжке [57-64] и прокатке [65-69]. Недавно Танг с соавторами провели серию исследований по электропластической вытяжке [70-73] и прокатке [74-76]. Результаты подтверждают наличие ЭПЭ в металлах и указывают на то, что ЭОМД хорошо подходит для производства деталей из металлов и их сплавов, которые трудно обрабатываются с помощью традиционных технологий. Например, Ван, с использованием ЭПЭ успешно реализовал штамповку магниевых сплавов [77].

### 2.1. Электропластическое волочение

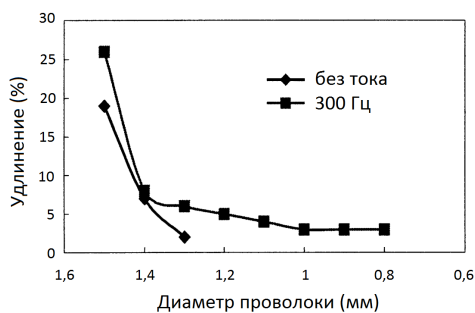
При электропластическом волочении (ЭПВ) ток подается либо на оборудование (волока), либо непосредственно на материал через обычные контакты. В ЭПВ проволоки из нержавеющей стали [58, 60-64, 78], Cu [59], и W [62, 79], обнаружено, что импульсы тока, проходящие через зону деформации металла, уменьшают усилие, необходимое для волочения. Уменьшение силы зависит от плотности тока, частоты импульсов, а также направления импульса, что наглядно иллюстрирует существование эффекта полярности. Громов и др. [78] сообщали, что электростимуляция оказывала множественное влияние на формирование субструктуры на различных структурных уровнях при вытягивании стальных проволок 08G2S и 17GKhAF. Недавно Тан и его коллеги изучили использование ЭПВ при холодном волочении различных металлов [70-73]. Импульсный ток во время волочения может снизить сопротивление деформации нержавеющей стали 304L [71]. По сравнению с традиционной технологией волочения ЭПВ может снизить удельное сопротивление холоднотянутой стальной проволоки более чем на 10 %, как показано на рис.1. При этом увеличивается удлинение проволоки до разрыва (см. рис.2). Во время ЭПВ уменьша-

ется образование ферромагнитной фазы при низкой скорости деформации, однако без электрических импульсов образуется большое количество вызванного деформацией мартенсита.



**Рис.1.** Сила волочения проволоки при импульсах тока частотой 300 Гц и без тока [71]

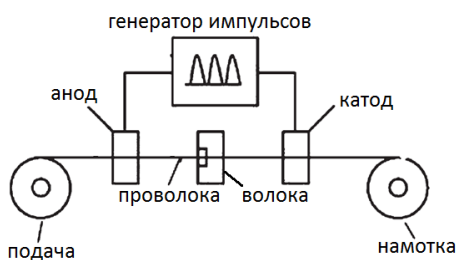
**Fig.1.** Wire drawing force with current pulses with a frequency of 300 Hz and without current [71]



**Рис.2.** Удлинение проволоки в двух процессах с импульсами тока частотой 300 Гц и без тока [71]

**Fig.2.** Wire elongation in two processes with and without current pulses of 300 Hz [71]

Что касается ЭПВ магниевого сплава [73], было обнаружено, что усилие волочения снижается примерно на 25 % по сравнению с обычным процессом волочения проволоки. При относительно низкой температуре за короткое время обработки происходит динамическая рекристаллизация (ДР), что повышает пластичность проволоки. На рис.3 схематически изображена система ЭПВ [73].

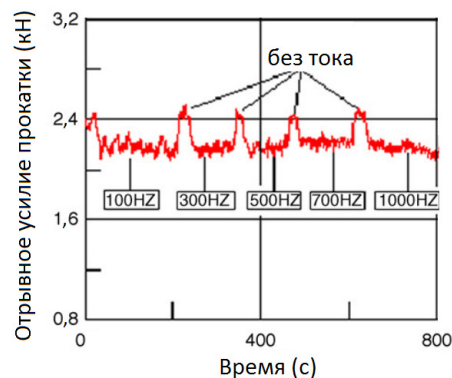


**Рис.3.** Процесс электропластического волочения [73]

**Fig.3.** The process of electroplastic drawing [73]

## 2.2. Электропластическая прокатка

При электропластической прокатке (ЭПП) ток подается либо на противоположные валки, либо непосредственно на материалы с помощью скользящих контактов. Российские исследователи произвели вольфрамовые листы, соответствующие самым высоким мировым стандартам, методом ЭПП [65-69, 80]. Пропуская импульсы электрического тока, Климов и др. [65] смогли раскатать вольфрамовые листы в полосы шириной 20-30 мм при комнатной температуре без вакуума. Недавно Сюй и соавторы [74, 76] получили полосы из магниевого сплава с использованием ЭПП при комнатной температуре. Во время ЭПП происходит резкое падение (примерно на 8 %) отрывного усилия прокатки, как показано на рис.4. Более того, динамическая рекристаллизация (ДРК) происходит при относительно низкой температуре за короткое время, как показано на рис.5.



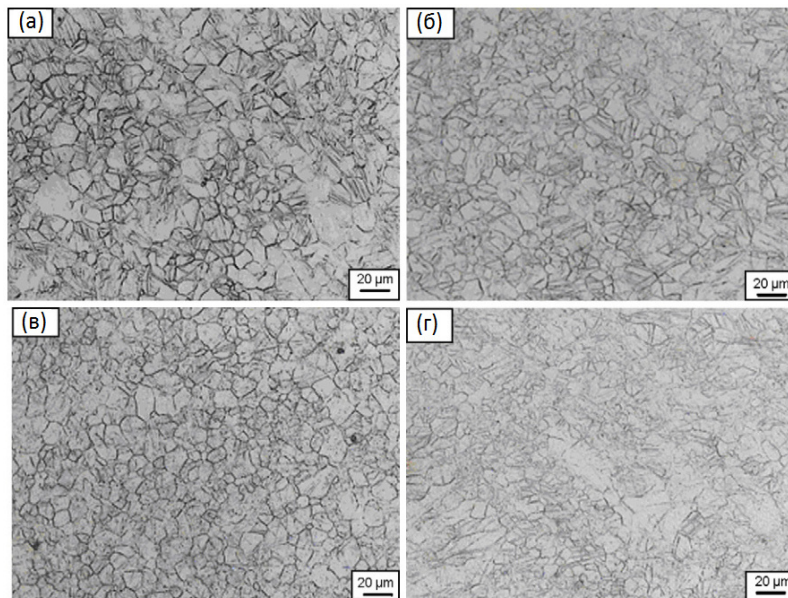
**Рис.4.** Диаграмма, иллюстрирующая отрывное усилие прокатки при изменении параметров электроимпульсного воздействия [74]

**Fig.4.** Diagram illustrating the tear-off force of rolling with a change in the parameters of the electric pulse action [74]

Совсем недавно Мальцев исследовал свойства металлов технической чистоты после ЭПП. Результаты показали, что прочностные и пластические свойства металлов после ЭПП увеличивались по мере увеличения степени деформации, как показано на рис.6. В сплавах TiNi с памятью формы в процессе ЭПП были сформированы наноструктуры. Столяров и др. сообщили, что ЭПП сплавов TiNi может быть использован для формирования различных типов микроструктур, например, смешанных аморфно-нанокристаллических, нанокристаллических и ультрамелкозернистых. Тип структуры определяется в основном плотностью импульсного тока, а также степенью пластической

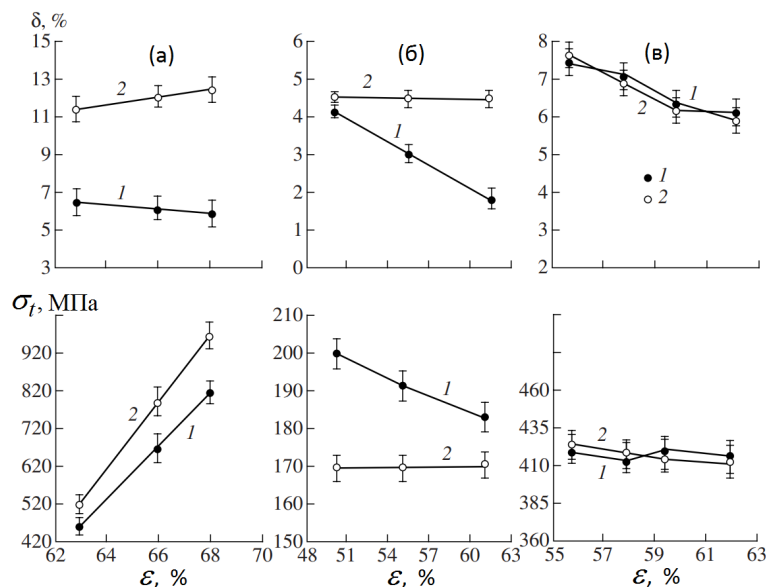
деформации. На рис.7 приведен пример микро-структуры, содержащей нанокристаллическую и аморфную фазы, сформировавшиеся в результате ЭПП. Установлено, что ЭПП обеспечивает повышенную деформируемость сплавов TiNi при повышении прочности и сохранении пластичности, как показано в таблице 1. Гуан и др. [75] провели исследование магниевого

сплава AZ31, проведя деформацию при больших деформациях с помощью ЭПП при комнатной температуре. Результаты показывают, что при комбинированном термическом и атермическом воздействии в результате ДРК образуются новые мелкие зерна. На рис.8 представлена схематическая иллюстрация системы ЭПП [75].



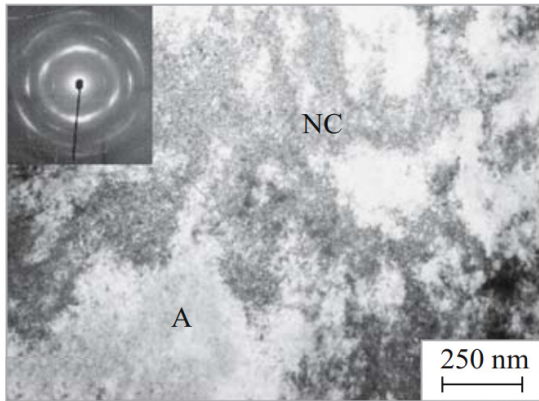
**Рис.5.** Микроструктура сплава AZ31 Mg после ЭПП с использованием различных частот электроимпульсного воздействия: (а) 100 Гц, (б) 300 Гц, (в) 500 Гц, (г) 700 Гц [74]

**Fig.5.** Microstructure of the AZ31 Mg alloy after EPT using different frequencies of electrical impulse action: (a) 100 Hz, (b) 300 Hz, (c) 500 Hz, (d) 700 Hz [74]



**Рис.6.** Влияние степени деформации на относительное удлинение  $\delta$  и временное усилие  $\sigma_t$  (1) в холоднотемпературно деформированных металлах и (2) после ЭПП: (а) Ti, (б) Al, (в) Cu [69]

**Fig.6.** The influence of the degree of deformation on relative elongation  $\delta$  and temporary force  $\sigma_t$  (1) in cold-worked metals and (2) after EPT: (a) Ti, (b) Al, (c) Cu [69]



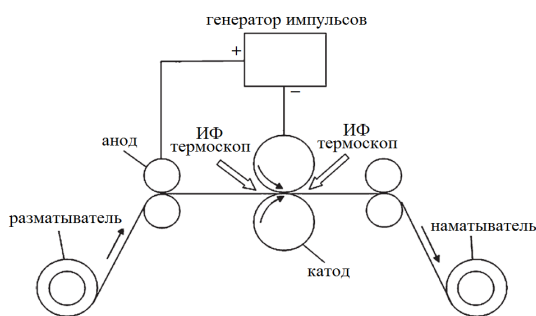
**Рис.7.** Микроструктура и микродифракция сплава TiNi после ЭПШ (плотность тока  $j=80 \text{ A/mm}^2$ ,  $e=0,8$ ; А и NC обозначают аморфную и нанокристаллическую фазы соответственно [81])

**Fig.7.** Microstructure and microdiffraction of the TiNi alloy after EPT (current density  $j=80 \text{ A/mm}^2$ ,  $e=0,8$ ; A and NC denote the amorphous and nanocrystalline phases, respectively [81])

**Таблица 1.** Данные о растяжении сплава NiTi при комнатной температуре в КЗ и УМЗ состояниях после ЭПП и отжига при 450 °С. Указаны значения уровня напряжения на плато  $\sigma_M$ , временное напряжение  $\sigma_B$ , напряжение течения  $\sigma_T$  и относительное удлинение  $\delta$

**Table 1.** Tensile data for the NiTi alloy at room temperature in the CG and UFG states after EPT and annealing at 450 °C. The values of the stress level on the plateau  $\sigma_M$ , temporary stress  $\sigma_B$ , flow stress  $\sigma_T$  and relative elongation  $\delta$  are indicated

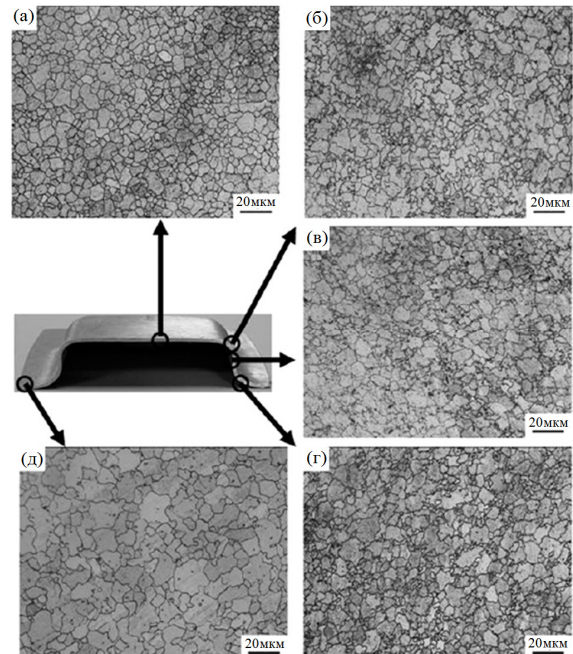
| Состояние               | $\sigma_M$<br>(МПа) | $\sigma_B$<br>(МПа) | $\sigma_T$<br>(МПа) | $\delta$<br>(%) |
|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| КЗ                      | 210                 | 940                 | 600                 | 40              |
| КЗ+ЭПП<br>( $e=1,81$ )  | 250                 | 1300                | 1200                | 9,6             |
| УМЗ                     | 290                 | 1240                | 1140                | 25              |
| УМЗ+ЭПП<br>( $e=1,91$ ) | 294                 | 1481                | 1395                | 8,0             |



**Рис.8.** Процесс электропластической прокатки  
**Fig.8.** Electroplastic rolling process

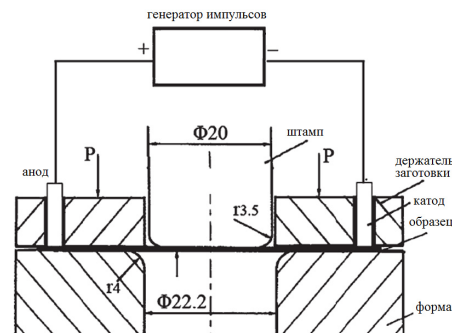
### 2.3. Электропластическая штамповка

При электропластической штамповке (ЭПШ) ток подается либо с противоположных сторон, либо непосредственно на материалы посредством упругого контакта. Влияние электрических импульсов на глубокую вытяжку магниевое сплава AZ31 было изучено Вангом [77]. При воздействии электрических импульсов достигается меньшее сопротивление деформации и лучшая пластичность. Вытяжка квадратных чашек глубиной 15 мм достигается методом ЭПШ за 2,5 мин, а ДРК происходит в зоне деформации при относительно низкой температуре 200 °С, как показано на рис.9. На рис.10 представлена схематическая иллюстрация установки ЭПШ [77].



**Рис.9.** Микроструктура деформированных зон после ЭПШ [77])

**Fig.9.** Microstructure of deformed zones after EPSH [77])



**Рис.10.** Процесс электропластической штамповки  
**Fig.10.** Electroplastic stamping process

### 3. Анализ достижений в области аппаратурного обеспечения электростимулированной обработки металлов давлением

В [82] рассматривалась система регулирования параметров стимуляции электрическими импульсами в процессе волочения (температуры в зоне деформации и усилия волочения), которая формирует управляющий сигнал на генератор мощных импульсов тока. Для оптимизации процесса выполнена двухконтурная система заряда конденсаторов подчиненного регулирования параметров с внешним контуром регулирования напряжения и внутренним контуром регулирования тока заряда конденсаторов. Была разработана система автоматического управления стимуляцией электрическими импульсами процесса волочения для повышения надежности и качества процесса волочения с использованием генератора мощных импульсов тока.

Для оптимизации режима работы используют одноконтурную систему автоматического управления усилием волочения с гибкой обратной связью по температуре в зоне деформации. Система предложена при исследовании для применения процессов стимуляции электрическими импульсами деформации и для внедрения в производство при волочении проволоки.

Разработка оборудования, необходимого для генерации мощных импульсов тока посвящены работы Жмакина с соавторами [83, 84]. Ими предложена конструкция частотно-регулируемого генератора мощных токовых импульсов с обратной связью по амплитуде [83] и генератор мощных токовых импульсов на запираемых тиристорах [84].

### 4. Достижение последних лет в области электропластической обработке металлов давлением

Работы по изучению электропластического эффекта и технологиям его применения в обработке металлов давлением непрерывно продолжаются [85-90]. В обзорной работе [85], при обсуждении методов производства с помощью электричества, упор делается на моделировании и понимании электропластического эффекта. Обработке по методу глубокой вытяжки деталей из высокопрочной листовой стали посвящено исследование [86]. Авторами работы [87] обсуждалось аномальное двойникование в магниевом сплаве AZ31 при электроформовании. Влияние эффекта Штарка всесторонне изучено в диссертационной работе Каминского

[88]. В монографии Громова, Зуева, Козлова и Целлермаера [89] рассмотрены проблемы электростимулированной пластичности металлов и сплавов. Моделированию воздействия электрического тока на пластическую деформацию материалов посвящена работа [90].

### Заключение

Метод ЭОМД имеет большой потенциал применения в промышленности. Он обладает существенными достоинствами, позволяя снижать сопротивление деформации, повышать пластичность, упрощать производственные процессы, повышать энергоэффективность, снижать стоимость и повышать качество продукции. Технология изготовления с использованием электрических импульсов может существенно повлиять на структуру, морфологию и свойства металла. Несмотря на то, что за последние несколько лет был достигнут существенный прогресс в развитии методов ЭОМД, для реализации всего потенциала этой технологии необходимы дальнейшие исследования.

### Список литературы

1. Troitskii O.A., Likhtman V.I. The effect of the anisotropy of electron and g radiation on the deformation of zinc single crystals in the brittle state // *Kokl. Akad. Nauk. SSSR*. 1963. V. 148. P. 332.
2. Troitskii O.A. Electro-mechanical effect in the brittle state // *Zh. Ekip. Teor. Fiz*. 1969. V. 10. P. 18.
3. Troitskii O.A., Rozno A.G. Electroplastic effects in metals // *Fiz. Tverd. Tela*. 1970. V. 12. P. 161.
4. Troitskii O.A. Rate and temperature dependence of the electroplastic effect // *Fiz. Met. Metalloved*. 1971. V. 32. P. 408.
5. Troitskii O.A. Simulation of the thermal and pinch effects of pulsed current on the plastic deformation of a metal // *Prob. Proch*. 1975. July 14.
6. Spitsyn V.I., Troitskii O.A. Simulation of the thermal and pinch effects of pulsed current on the plastic deformation of a metal // *Dokl. Akad. Nauk*. 1975. V. 220. P. 1070.
7. Troitskii O.A. The effect of an electric current on the relaxation of stresses in crystals of zinc // *Fiziko-Khim. Mevh. Mater*. 1977. V. 13. P. 46.
8. Troitskii O.A., Spitsyn V.I., Stashenko V.I. The effect of an electric current on the relaxation of stresses in crystals of zinc // *Dokl. Akad. Nauk*. 1978. V. 241. P. 349.



9. Troitskii O.A., Stashenko V.I. Stress relaxation investigation of the electroplastic deformation of a metal // *Fiz. Met. Metalloved.* 1979. V. 47. P. 180.
10. Troitskii O.A., Stashenko V.I., Kalymbetov P.U. The electroplastic effect in oppositely moving pulses // *Dokl. Akad. Nauk.* 1980. V. 253. P. 96.
11. Troitskii O.A., Kalymbetov P.U. Determination of the mechanical stresses induced by current // *Fiziko Metall.* 1981. V. 51. P. 219.
12. Troitskii O.A., Stashenko V.I. Dependence of the electroplastic effect in zinc on individual pulse lengths // *Fiziko Metall.* 1981. V. 51. P. 1056.
13. Stashenko V.I., Troitskii O.A. Influence of pulsating current frequencies and external mechanical stress on the creep rate of crystals // *Fiz. Met. Metalloved.* 1982. V. 53. P. 180.
14. Stashenko V.I., Troitskii O.A., Spitsyn V.I. Action of current pulses on zinc single crystals during creep // *Phys. Status Solidi A.* 1983. V. 79. P. 549.
15. Zuyev L.V., Gromov V.E., Kurilov V.F. Motion of dislocations under the influence of current pulses in monocrystalline zinc // *Dokl. Akad. Nauk.* 1978. V. 239. P. 84.
16. Boyko Yu.I., Geguzin Ya.E., Klinchuk Yu.I. Experimental discovery of entrainment of dislocation by an electron wind in metals // *Zh. Exsp. Teor. Fiz.* 1979. V. 30. P. 154.
17. Spitsyn V.I., Troitskii O.A., Glazunov P.Ya. Electroplastic deformation of metal before brittle fracture // *Dokl. Akad. Nauk.* 1971. V. 199. P. 810.
18. Troitskii O.A., Skobtsov I.L., Menshikh A.V. Electroplastic deformation of metal brittle rupture // *Fiziko Metall.* 1972. V. 33. P. 392.
19. Finkel V.M., Golovin Yu.I., Sletkov A.A. Destruction of top of a crack by a strong electromagnetic-field // *Dokl. Akad. Nauk.* 1977. V. 2. P. 325.
20. Karpenko G.V., Kuzin O.A., Tkachev V.I., Rudenko V.P. Effect of electric-current on low-cycle fatigue of steel // *Dokl. Akad. Nauk.* 1976. V. 227. P. 85.
21. Spitsyn V.I., Troitskii O.A. Effect of electric-current and pulsed magnetic-field on metal creep rate // *Dokl. Akad. Nauk. S.S.S.R. Ser. Metallii.* 1974. V. 216. P. 1266.
22. Spitsyn V.I., Troitskii O.A. Electroplastic effect in metals // *Vest. Akad. Nauk. Stal. SSSR.* 1974. V. 11. P. 10.
23. Klimov K.M., Shnyrev G.D., Novikov I.I. Electroplasticity of metals // *Dokl. Akad. Nauk.* 1974. V. 219. P. 323.
24. Spitsyn V.I., Troitskii O.A., Ryzhkov V.G., Kozyrev A.S. Single-die electroplastic drawing of very fine copper wires // *Dokl. Akad. Nauk.* 1976. V. 231. P. 402.
25. Spitsyn V.I., Kopiev A.V., Ryzhkov V.G., Sokilov N.V., Troitskii O.A. Flattening mill for finest tungsten spring band using ultrasound and electroplastic effect // *Dokl. Akad. Nauk.* 1977. V. 236. P. 861.
26. Troitskii O.A., Spitsyn V.I., Sokolov N.V., Ryzhkov V.G. Electroplastic drawing of stainless-steels // *Dokl. Akad. Nauk.* 1977. V. 237. P. 1082.
27. Troitskii O.A., Spitsyn V.I., Ryzhkov V.G. Electroplastic drawing of steel, copper, and tungsten // *Dokl. Akad. Nauk.* 1978. V. 243. P. 330.
28. Klimov K.M., Novikov I.I. Effect of a temperature-gradient and a high-density electric-current on the plastic-deformation of wire // *Russ. Metall.* 1978. V. 6. P. 127.
29. Zaretskii A.V., Osipyanyan Y.A., Petrenko V.F. Mechanism of electroplastic effect in zinc // *Fiz. Tverd. Tela.* 1978. V. 20. P. 1442.
30. Klimov K.M., Novikov I.I. Effect of current pulses on the deformation of metallic wires // *IZV Akad. Nauk. S.S.S.R. Met.* 1983. V. 3. P. 160.
31. Boyko Yu.I., Geguzin Ya.E., Klinchuk Yu.I. Experimental discovery of entrainment of dislocations by an electron wind in metals // *Zh. Exsp. Teor. Fiz.* 1979. V. 30. P. 154.
32. Klimov K.M., Burkhanov Yu.S., Novikov I.I. Effect of a high-density electric-current on the plastic-deformation of aluminum // *Strength Mater.* 1985. V. 17. P. 782.
33. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. A study of the electroplastic effect in metals // *Scr. Metall.* 1978. V. 12. P. 1036.
34. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. Additional results on the electroplastic effect in metals // *Scr. Metall.* 1979. V. 13. P. 277.
35. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. Effects of strain rate, temperature and interstitial content on the electroplastic effect in titanium // *Scr. Metall.* 1979. V. 13. P. 473.
36. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. An evaluation of the contribution of skin, pinch and heating effects to the electroplastic effect in titanium // *Mater. Sci. Eng.* 1980. V. 45. P. 109.
37. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. The electro-plastic effect in titanium, in *Titanium'80 Science and Technology. TMS-AIME, Warrendale, PA, 1980.* 763 p.
38. Sprecher A.F., Mannan S.L., Conrad H. On the temperature rise associated with the electroplastic effect in titanium // *Scr. Metall.* 1983. V. 17. P. 769.

39. Conrad H., Sprecher A.F., Mannan S.L. Proceedings International Symposium on Mechanics of Dislocation, edited by E.C. Aifantis and J.P. Hirth. American Society for Metals, Metals Park, OH, 1985. 225 p.
40. Cao W.D., Sprecher A.F., Conrad H. Measurement of the electroplastic effect in Nb // *Scr. Metall.* 1989. V. 22. P. 1026.
41. Cao W.D., Sprecher A.F., Conrad H. Effect of strain rate on the electroplastic effect in Nb // *Scr. Metall.* 1989. V. 23. P. 151.
42. Cao W.D., Conrad H. Effect of stacking fault energy and temperature on the electroplastic effect in FCC metals, in *Micromechanics of Advanced Materials – A Symposium in Honor of Professor James C.M. Li’s 70th birthday*. Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, PA, 1995. 225 p.
43. Varma S.K., Cornwell L.R. Comments on the electroplastic effect in aluminum-reply // *Scr. Metall.* 1980. V. 14. P. 1035.
44. Goldman P.D., Motowidlo L.R., Galligan G.M. The absence of an electroplastic effect in lead at 4.2 K // *Sci. Metall.* 1981. V. 15. P. 353.
45. Varma S.K., Cornwell L.R. Electroplastic effect in aluminum // *Scr. Metall.* 1979. V. 13. P. 733.
46. Varma S.K., Cornwell L.R. Comments on the electroplastic effect in aluminum-reply // *Scr. Metall.* 1980. V. 14. P. 1035.
47. Troitskii O.A. Radiation-Induced Changes in the Strength and Plasticity of Zinc Single Crystals. Moscow, 1968.
48. Heigel J.C., Andrawes J.S., Roth J.T., Hoque M.E., Frd R.M. Viability of electrically treating 6061 T6511 aluminum for use in manufacturing processes // *Trans. NAMRI/SME*. 2005. V. 33. P. 145.
49. Ross C., Roth J.T. The effects of DC current on the tensile properties of metals, in *Proceedings of the ASME Materials Division Roth 100*. ASME, New York, 2005. P. 363.
50. Zhu Y.H., To S., Lee W.B., Liu X.M., Jiang Y.B., Tang G.Y. Effects of dynamic electro-pulsing on microstructure and elongation of a Zn-Al alloy // *Mater. Sci. Eng. A*. 2009. V. 501. P. 125.
51. Egea A.J.S., Rojas H.A.G., Celentano D.J., Peiró J.J. Mechanical and metallurgical changes on 308L wires drawn by electropulses // *Materials & Design*. 2016. V. 90. P. 1159–1169.
52. Li X., Wang F., Li X., Zhu J., Tang G. Mg–3Al–1Zn alloy strips processed by electroplastic differential speed rolling // *Materials Science and Technology*. 2017. V. 33(2). P. 215–219.
53. Егорушкин В.Е., Панин В.Е., Панин А.В. Кривизна решетки, полосы локализованного сдвига и механизм электропластического эффекта // *Физическая мезомеханика*. 2018. Т. 21, № 3. С. 5–11.
54. Гагарин А.Ю., Сарычев В.Д., Невский С.А., Потекаев А.И. Влияние импульсного электрического тока на характер движения автоволн пластической деформации при растяжении стальной пластины // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62, № 2. С. 148–153.
55. Troitskii O.A., Nikitenko Yu.V., Moiseev M.M. Electroplastic deformation process for metals – Stopping blank deformation at stress level between 1.5 times yield point of metal and 0.9 times its ultimate strength. Patent SU1687349-A1. 1991.
56. Troitskii O.A., Troitskii V.O. Method for plastic working of metals involves applying current pulses, rolling, drawing, flattening frequency to multiple frequency of ultrasonic oscillations by ultrasound generator in predetermined range thus improve efficiency. Patent RU2321468-C2. 2008.
57. Klimov K.M., Novikov I.I. Effects of temperature gradient and a high-density electric current on the plastic deformation of wire // *Russ. Metall.* 1978. V. 6. P. 175.
58. Spitsyn V.I., Troitskii O.A., Gusev E.V., Kurdiukov V.D.K. Electroplastic deformation of stainless (18/9) steel // *Izv. Akad. Nauk SSSR [Khim]*. 1974. V. 2. P. 123.
59. Spitsyn V.I., Troitskii O.A., Gaviish A.A., Karynkin V.I., Shaka G.E., Stashenko V.I., Kozыrev A.S. X-ray diffraction and mechanical investigation of copper after electroplastic drawing // *Izv. Akad. Nauk SSSR [Khim]*. 1978. V. 4. P. 120.
60. Troitskii O.A., Spitsyn V.O., Sokolov N.V., Ryzhkov V.G., Dubov Yu.S. Electroplastic drawing of magnetically hard steel wire // *Izv. Akad. Nauk SSSR [Khim]*. 1979. V. 2. P. 113.
61. Troitskii O.A., Stashenko V.I., Sokolov N.V., Ryzhkov V.G. Electroplastic drawing of stainless steel // *DAN S.S.S.R.* 1977. V. 237. P. 1082.
62. Troitskii O.A., Stashenko V.I., Ryzhkov V.G. Electroplastic drawing of steel, copper and tungsten // *DAN S.S.S.R.* 1978. V. 243. P. 330.
63. Bazaykin V.I., Gromov V.E., Kuznetsov V.A., Peretyatho V.N. Mechanics of electrostimulated wire drawing // *Int. J. Solids Struct.* 1991. V. 27. P. 1693.
64. Klimov K.M. Alternative methods of producing bars and wire // *Metallurgist*. 2007. V. 51. P. 511.
65. Klimov K.M., Shnyrev G.D., Novikov I.I., Isaev A.V. Electroplastic rolling of tungsten and

- tungsten-rhenium wire into strip of micro thickness // *Russ. Metall.* 1975. V. 4. P. 107.
66. Spitsyn V.I., Kopiev A.V., Ryzhkov V.G., Sokolov N.V., Troitskii O.A. Flattening mill for finest tungsten spring band using ultrasound and electroplastic effect // *Dokl. Akad. Nauk.* 1977. V. 236. P. 861.
67. Klimov K.M., Morukhovich A.M., Glezer A.M., Molotilov B.V. Rolling of iron-cobalt alloys which are different to pressure-form, using a high density electric current // *Izv. Akad. Nauk SSSR.* 1981. V. 6. P. 69.
68. Klimov K.M., Novikov I.I. Absence of strain hardening upon electrostimulated rolling of metals under cold conditions // *Dokl. Phys.* 2007. V. 52. P. 359.
69. Mal'tsev I.M. Electroplastic rolling of metals with a high-density current // *Russ. J. Non-Ferrous Met.* 2008. V. 49. P. 175.
70. Tang G.Y., Zheng M.X., Zhu Y.H., Zhang J., Fang W., Li Q. The application of the electroplastic technique in the cold-drawing of steel wires // *J. Mater. Process. Technol.* 1998. V. 84. P. 268.
71. Tang G.Y., Zhang J., Zheng M.X., Zhang J., Fang W., Li Q. Experimental study of electroplastic effect on stainless steel wire 304L // *Mater. Sci. Eng. A.* 2000. V. 281. P. 263.
72. Tang G.Y., Zhang J., Yan Y.J., Zhou H.H., Fang W. The engineering application of the electroplastic effect in the cold-drawing of stainless steel wire // *J. Mater. Process. Technol.* 2003. V. 137. P. 96.
73. Tian H.Y., Tang G.Y., Ding F., Xu Z.H., Jiang Y.B. Research on electroplastic drawing of Mg alloy wire // *Nonferrous Met.* 2007. V. 59. P. 10.
74. Xu Z.H., Tang G.Y., Tian S.Q., Ding F., Tian H.Y. Research of electroplastic rolling of AZ31 Mg alloy strip // *J. Mater. Process. Technol.* 2007. V. 182. P. 128.
75. Guan L., Tang G., Chu P.K. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals // *Journal of Materials Research.* 2010. V. 25. P. 1215–1224.
76. Tang G.Y., Xu Z.H., Tian S.Q., Xiao C. Electroplastic rolling method and apparatus for deformable magnesium alloy sheet, band and wire rod. Patent CN1891363-A. 2007.
77. Wang S.N. Effect of electric pulses on drawability and corrosion property of AZ31 magnesium alloy // Master Thesis. Beijing, Tsinghua University. 2009.
78. Gromov V.E., Kozlov E.V., Zuev L.B., Tsellermaer V.Ya., Aponasenkov O.V. Defect structure of ferrite and austenite steels developed under electrostimulated plastic deformation // *Int. Congr. Bioceram. Hum. Body.* 1994. V. 2. P. 46.
79. Spitsyn V.I., Troitskii O.A., Levin L.V. Drawing of electrically conductive wire – by connection of draw current source pole to deformation zone to facilitate drawing at high rates based on electro-plastic effect. Patent SU584934-A. 1977.
80. Spitsyn V.I., Stashenko V.I., Troitskii O.A. Metal foil pressure treatment – with specified pulse rate of current passing through blank to speed up process. Patent SU829241-B. 1981.
81. Stolyarov V.V., Ugurchiev U.Kh., Gurtovaya I.B., Prokoshkin S.D. Increase in the deformability of coarse-grained TiNi alloy rolled with superimposition of pulse current // *Metal Sci. Heat Treat.* 2008. V. 50. P. 132.
82. Кузнецов В.А., Кузнецова Е.С., Громов В.Е., Косинов Д.А. Система автоматического управления процессом электростимулированного волочения // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* 2018. Т. 61, № 8. С. 613–619.
83. Жмакин Ю.Д., Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Громов В.Е., Кузнецов В.А. Частотно-регулируемый генератор мощных токовых импульсов с обратной связью по амплитуде // *Промышленная энергетика.* 2011. № 1. С. 28–31.
84. Жмакин Ю.Д., Загуляев Д.В., Коновалов С.В., Громов В.Е., Кузнецов В.А. Генератор мощных токовых импульсов на запираемых тиристорах // *Промышленная энергетика.* 2010. № 6. С. 39–41.
85. Ruzskiewicz B.J., Grimm T., Ragai I., Mears L., Roth J.T. A review of electrically-assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect // *Journal of Manufacturing Science and Engineering.* 2017. V. 139, N 11. P. 110801(1-15).
86. Lv Z., Zhou Y., Zhan L., Zang Z., Zhou B., Qin S. Electrically assisted deep drawing on high-strength steel sheet // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2021. V. 112, Iss. (3–4). P. 763–773.
87. Gerstein G., Körkemeyer F., Dalinger A., Zaefferer S., Maier H.J. Anomalous twinning in AZ31 magnesium alloy during electrically assisted forming // *Materials Letters.* 2019. V. 255. P. 126516.
88. Каминский П.П. Необратимая деформация кристаллов как структурное превращение, инициируемое изменением межатомного взаимодействия: дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск: ИФПМ СО РАН, 2015. 243 с.
89. Громов В.Е., Зуев Л.Б., Козлов Э.В., Целлермаер В.Я. Электростимулированная

пластичность металлов и сплавов. М.: Недра, 1996. 293 с.

90. Сарычев В.Д., Гагарин А.Ю., Невский С.А., Грановский А.Ю. Моделирование воздействия электрического тока на пластическую деформацию материалов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019. Т. 16, № 3. С. 315–322.

### Информация об авторах

Д. У. Абдуллина – младший научный сотрудник Института физики молекул и кристаллов Уфимского федерального исследовательского центра.

Ю. В. Бебихов – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика и автоматизация промышленного производства» Политехнического института (филиала) в г. Мирном, Северо-Восточный федеральный университет.

П. С. Татаринов – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и автоматизация промышленного производства» Политехнического института (филиала) в г. Мирном, Северо-Восточный федеральный университет.

С. В. Дмитриев – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией «Нелинейная динамика молекул и кристаллов» Института физики молекул и кристаллов Уфимского федерального исследовательского центра.

### References

1. Troitskii, O. A. & Likhtman, V. I. (1963). The effect of the anisotropy of electron and  $\gamma$  radiation on the deformation of zinc single crystals in the brittle state. *Kokl. Akad. Nauk. SSSR*, 148, 332.
2. Troitskii, O. A. (1969). Electro-mechanical effect in the brittle state. *Zh. Eshp. Teor. Fiz.*, 10, 18.
3. Troitskii, O. A. & Rozno, A. G. (1970). Electroplastic effects in metals. *Fiz. Tverd. Tela.*, 12, 161.
4. Troitskii, O. A. (1971). Rate and temperature dependence of the electroplastic effect. *Fiz. Met. Metalloved.*, 32, 408.
5. Troitskii, O. A. (1975). Simulation of the thermal and pinch effects of pulsed current on the plastic deformation of a metal. *Prob. Proch. July 14*.
6. Spitsyn, V. I. & Troitskii, O. A. (1975). Simulation of the thermal and pinch effects of pulsed current on the plastic deformation of a metal. *Dokl. Akad. Nauk*, 220, 1070.
7. Troitskii, O. A. (1977). The effect of an electric current on the relaxation of stresses in crystals of zinc. *Fiziko-Khim. Mevh. Mater.*, 13, P. 46.
8. Troitskii, O. A., Spitsyn, V. I. & Stashenko, V. I. (1978). The effect of an electric current on the relaxation of stresses in crystals of zinc. *Dokl. Akad. Nauk*, 241, 349.
9. Troitskii, O. A. & Stashenko, V. I. (1979). Stress relaxation investigation of the electroplastic deformation of a metal. *Fiz. Met. Metalloved.*, 47, 180.
10. Troitskii, O. A., Stashenko, V. I. & Kalymbetov, P. U. (1980). The electroplastic effect in oppositely moving pulses. *Dokl. Akad. Nauk.*, 253, 96.
11. Troitskii, O. A. & Kalymbetov, P. U. (1981). Determination of the mechanical stresses induced by current. *Fiziko Metall.*, 51, 219.
12. Troitskii, O. A. & Stashenko, V. I. (1981). Dependence of the electroplastic effect in zinc on individual pulse lengths. *Fiziko Metall.*, 51, 1056.
13. Stashenko, V. I. & Troitskii, O. A. (1982). Influence of pulsating current frequencies and external mechanical stress on the creep rate of crystals. *Fiz. Met. Metalloved.*, 53, 180.
14. Stashenko, V. I., Troitskii, O. A. & Spitsyn, V. I. (1983). Action of current pulses on zinc single crystals during creep. *Phys. Status Solidi A.*, 79, 549.
15. Zuyev, L. V., Gromov, V. E. & Kurilov, V. F. (1978). Motion of dislocations under the influence of current pulses in monocrystalline zinc. *Dokl. Akad. Nauk*, 239, 84.
16. Boyko, Yu. I., Geguzin, Ya. E. & Klinchuk, Yu. I. (1979). Experimental discovery of entrainment of dislocation by an electron wind in metals. *Zh. Eshp. Teor. Fiz.*, 30, 154.
17. Spitsyn, V. I., Troitskii, O. A. & Glazunov, P. Ya. (1971). Electroplastic deformation of metal before brittle fracture. *Dokl. Akad. Nauk*, 199, 810.
18. Troitskii, O. A., Skobtsov, I. L. & Men-shikh, A. V. (1972). Electroplastic deformation of metal brittle rupture. *Fiziko Metall.*, 33, 392.
19. Finkel, V. M., Golovin, Yu. I. & Sletkov, A. A. (1977). Destruction of top of a crack by a strong electromagnetic-field. *Dokl. Akad. Nauk*, 2, 325.
20. Karpenko, G. V., Kuzin, O. A., Tkachev, V. I. & Rudenko, V. P. (1976). Effect of electric-current on low-cycle fatigue of steel. *Dokl. Akad. Nauk*, 227, 85.
21. Spitsyn, V. I. & Troitskii, O. A. (1974). Effect of electric-current and pulsed magnetic-field

- on metal creep rate. *Dokl. Akad. Nauk. S.S.S.R. Ser. Metallii.*, 216, 1266.
22. Spitsyn, V. I. & Troitskii, O. A. (1974). Electroplastic effect in metals. *Vest. Akad. Nauk. Stal. SSSR*, 11, 10.
23. Klimov, K. M., Shnyrev, G. D. & Novikov, I. I. (1974). Electroplasticity of metals. *Dokl. Akad. Nauk*, 219, 323.
24. Spitsyn, V. I., Troitskii, O. A., Ryzhkov, V. G. & Kozyrev, A. S. (1976). Single-die electroplastic drawing of very fine copper wires. *Dokl. Akad. Nauk*, 231, 402.
25. Spitsyn, V. I., Kopiev, A. V., Ryzhkov, V. G., Sokilov, N. V. & Troitskii, O. A. (1977). Flattening mill for finest tungsten spring band using ultrasound and electroplastic effect. *Dokl. Akad. Nauk*, 236, 861.
26. Troitskii, O. A., Spitsyn, V. I., Sokolov, N. V. & Ryzhkov, V. G. (1977). Electroplastic drawing of stainless-steels. *Dokl. Akad. Nauk*, 237, 1082.
27. Troitskii, O. A., Spitsyn, V. I. & Ryzhkov, V. G. (1978). Electroplastic drawing of steel, copper, and tungsten. *Dokl. Akad. Nauk*, 243, 330.
28. Klimov, K. M. & Novikov, I. I. (1978). Effect of a temperature-gradient and a high-density electric-current on the plastic-deformation of wire. *Russ. Metall.*, 6, 127.
29. Zaretskii, A. V., Osipyany, Y. A. & Petrenko, V. F. (1978). Mechanism of electroplastic effect in zinc. *Fiz. Tverd. Tela.*, 20, 1442.
30. Klimov, K. M. & Novikov, I. I. (1983). Effect of current pulses on the deformation of metallic wires. *IZV Akad. Nauk. S.S.S.R. Met.*, 3, 160.
31. Boyko, Yu. I., Geguzin, Ya. E. & Klinchuk, Yu. I. (1979). Experimental discovery of entrainment of dislocations by an electron wind in metals. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 30, 154.
32. Klimov, K. M., Burkhanov, Yu. S. & Novikov, I. I. (1985). Effect of a high-density electric-current on the plastic-deformation of aluminum. *Strength Mater.*, 17, 782.
33. Okazaki, K., Kagawa, M. & Conrad, H. (1978). A study of the electroplastic effect in metals. *Scr. Metall.*, 12, 1036.
34. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. (1979). Additional results on the electroplastic effect in metals. *Scr. Metall.*, 13, 277.
35. Okazaki K., Kagawa M. & Conrad H. (1979). Effects of strain rate, temperature and interstitial content on the electroplastic effect in titanium. *Scr. Metall.*, 13, 473.
36. Okazaki, K., Kagawa, M. & Conrad, H. (1980). An evaluation of the contribution of skin, pinch and heating effects to the electroplastic effect in titanium. *Mater. Sci. Eng.*, 45, 109.
37. Okazaki, K., Kagawa, M. & Conrad, H. (1980). The electro-plastic effect in titanium, in Titanium'80 Science and Technology. TMS-AIME, Warrendale, PA. P. 763.
38. Sprecher, A. F., Mannan, S. L. & Conrad, H. (1983). On the temperature rise associated with the electroplastic effect in titanium. *Scr. Metall.*, 17, 769.
39. Conrad, H., Sprecher, A. F. & Mannan, S. L. (1985). Proceedings International Symposium on Mechanics of Dislocation, edited by E. C. Aifantis and J. P. Hirth. American Society for Metals, Metals Park, OH. P. 225.
40. Cao, W. D., Sprecher, A. F. & Conrad, H. (1989). Measurement of the electroplastic effect in Nb. *Scr. Metall.*, 22, 1026.
41. Cao, W. D., Sprecher, A. F. & Conrad, H. (1989). Effect of strain rate on the electroplastic effect in Nb. *Scr. Metall.*, 23, 151.
42. Cao, W. D. & Conrad, H. (1995). Effect of stacking fault energy and temperature on the electroplastic effect in FCC metals, in Micromechanics of Advanced Materials – A Symposium in Honor of Professor James C.M. Li's 70th birthday. Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, PA. P. 225.
43. Varma, S. K. & Cornwell, L. R. (1980). Comments on the electroplastic effect in aluminum-reply. *Scr. Metall.*, 14, 1035.
44. Goldman, P. D., Motowidlo, L. R. & Galligan, G. M. (1981). The absence of an electroplastic effect in lead at 4.2 K. *Sci. Metall.*, 15, 353.
45. Varma, S. K. & Cornwell, L. R. (1979). Electroplastic effect in aluminum. *Scr. Metall.*, 13, 733.
46. Varma, S. K. & Cornwell, L. R. (1980). Comments on the electroplastic effect in aluminum-reply. *Scr. Metall.*, 14, 1035.
47. Troitskii, O. A. (1968). Radiation-Induced Changes in the Strength and Plasticity of Zinc Single Crystals. Moscow.
48. Heigel, J. C., Andrawes, J. S., Roth, J. T., Hoque, M. E. & Frd, R. M. (2005). Viability of electrically treating 6061 T6511 aluminum for use in manufacturing processes. *Trans. NAMRI/SME*, 33, 145.
49. Ross, C. & Roth, J. T. (2005). The effects of DC current on the tensile properties of metals, in Proceedings of the ASME Materials Division Roth 100. ASME, New York. P. 363.
50. Zhu, Y. H., To, S., Lee, W. B., Liu, X. M., Jiang, Y. B. & Tang, G. Y. (2009). Effects of dynamic electropulsing on microstructure and elongation of a Zn-Al alloy. *Mater. Sci. Eng. A*, 501, 125.
51. Egea, A. J. S., Rojas, H. A. G., Celentano, D. J. & Peiró, J. J. (2016). Mechanical and metal-

- lurgical changes on 308L wires drawn by electropulses. *Materials & Design*, 90, 1159–1169.
52. Li, X., Wang, F., Li, X., Zhu, J. & Tang G. (2017). Mg–3Al–1Zn alloy strips processed by electroplastic differential speed rolling. *Materials Science and Technology*, 33(2), 215–219.
53. Egorushkin, V. E., Panin, V. E. & Panin, A. V. (2018). Krivizna reshetki, polosy lokalizovannogo sdviga i mekhanizm elektroplasticheskogo efekta. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 21(3), 5–11. (In Russ.).
54. Gagarin, A. Yu., Sarychev, V. D., Nevskiy, S. A. & Potekayev, A. I. (2019). Vliyaniye impul'snogo elektricheskogo toka na kharakter dvizheniya avtovoln plasticheskoy deformatsii pri rastyazhenii stal'noy plastiny. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 62(2), 148–153. (In Russ.).
55. Troitskii, O. A., Nikitenko, Yu. V. & Moiseev, M. M. (1991). Electroplastic deformation process for metals – Stopping blank deformation at stress level between 1.5 times yield point of metal and 0.9 times its ultimate strength. Patent SU1687349-A1.
56. Troitskii, O. A. & Troitskii, V. O. (2008). Method for plastic working of metals involves applying current pulses, rolling, drawing, flattening frequency to multiple frequency of ultrasonic oscillations by ultrasound generator in predetermined range thus improve efficiency. Patent RU2321468-C2.
57. Klimov, K. M. & Novikov, I. I. (1978). Effects of temperature gradient and a high-density electric current on the plastic deformation of wire. *Russ. Metall.*, 6, 175.
58. Spitsyn, V. I., Troitskii, O. A., Gusev, E. V. & Kurdiukov, V. D. K. (1974). Electroplastic deformation of stainless (18/9) steel. *Izv. Akad. Nauk SSSR [Khim]*, 2, 123.
59. Spitsyn, V. I., Troitskii, O. A., Gaviish, A. A., Karynkin, V. I., Shaka, G. E., Stashenko, V. I. & Kozyrev, A. S. (1978). X-ray diffraction and mechanical investigation of copper after electroplastic drawing. *Izv. Akad. Nauk SSSR [Khim]*, 4, 120.
60. Troitskii, O. A., Spitsyn, V. O., Sokolov, N. V., Ryzhkov, V. G. & Dubov, Yu. S. (1979). Electroplastic drawing of magnetically hard steel wire. *Izv. Akad. Nauk SSSR [Khim]*, 2, 113.
61. Troitskii, O. A., Stashenko, V. I., Sokolov, N. V. & Ryzhkov, V. G. (1977). Electroplastic drawing of stainless steel. *DAN S.S.S.R.*, 237, 1082.
62. Troitskii, O. A., Stashenko, V. I. & Ryzhkov, V. G. (1978). Electroplastic drawing of steel, copper and tungsten. *DAN S.S.S.R.*, 243, 330.
63. Bazaykin, V. I., Gromov, V. E., Kuznetsov, V. A. & Peretyatho, V. N. (1991). Mechanics of electrostimulated wire drawing. *Int. J. Solids Struct.*, 27, 1693.
64. Klimov, K. M. (2007). Alternative methods of producing bars and wire. *Metallurgist*, 51, 511.
65. Klimov, K. M., Shnyrev, G. D., Novikov, I. I. & Isaev, A. V. (1975). Electroplastic rolling of tungsten and tungsten-rhenium wire into strip of micro thickness. *Russ. Metall.*, 4, 107.
66. Spitsyn, V. I., Kopiev, A. V., Ryzhkov, V. G., Sokolov, N. V. & Troitskii, O. A. (1977). Flattening mill for finest tungsten spring band using ultrasound and electroplastic effect. *Dokl. Akad. Nauk*, 236, 861.
67. Klimov, K. M., Morukhovich, A. M., Glezer, A. M. & Molotilov, B. V. (1981). Rolling of iron-cobalt alloys which are different to pressure-form, using a high density electric current. *Izv. Akad. Nauk SSSR*, 6, 69.
68. Klimov, K. M. & Novikov, I. I. (2007). Absence of strain hardening upon electrostimulated rolling of metals under cold conditions. *Dokl. Phys.*, 52, 359.
69. Mal'tsev, I. M. (2008). Electroplastic rolling of metals with a high-density current. *Russ. J. Non-Ferrous Met.*, 49, 175.
70. Tang, G. Y., Zheng, M. X., Zhu, Y. H., Zhang, J., Fang, W. & Li, Q. (1998). The application of the electro-plastic technique in the cold-drawing of steel wires. *J. Mater. Process. Technol.*, 84, 268.
71. Tang, G. Y., Zhang, J., Zheng, M. X., Zhang, J., Fang, W. & Li, Q. (2000). Experimental study of electroplastic effect on stainless steel wire 304L. *Mater. Sci. Eng. A*, 281, 263.
72. Tang, G. Y., Zhang, J., Yan, Y. J., Zhou, H. H. & Fang, W. (2003). The engineering application of the electroplastic effect in the cold-drawing of stainless steel wire. *J. Mater. Process. Technol.*, 137, 96.
73. Tian, H. Y., Tang, G. Y., Ding, F., Xu, Z. H. & Jiang, Y. B. (2007). Research on electroplastic drawing of Mg alloy wire. *Nonferrous Met.*, 59, 10.
74. Xu, Z. H., Tang, G. Y., Tian, S. Q., Ding, F. & Tian, H. Y. (2007). Research of electroplastic rolling of AZ31 Mg alloy strip. *J. Mater. Process. Technol.*, 182, 128.
75. Guan, L., Tang, G. & Chu, P. K. (2010). Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals. *Journal of Materials Research*, 25, 1215–1224.
76. Tang, G. Y., Xu, Z. H., Tian, S. Q. & Xiao, C. (2007). Electroplastic rolling method and

apparatus for deformable magnesium alloy sheet, band and wire rod. Patent CN1891363-A.

77. Wang, S. N. (2009). Effect of electric pulses on drawability and corrosion property of AZ31 magnesium alloy. Master Thesis. Beijing, Tsinghua University.

78. Gromov, V. E., Kozlov, E. V., Zuev, L. B., Tsellermaer, V. Ya. & Aponasenkov, O. V. (1994). Defect structure of ferrite and austenite steels developed under electrostimulated plastic deformation. *Int. Congr. Bioceram. Hum. Body*, 2, 46.

79. Spitsyn, V. I., Troitskii, O. A. & Levin, L. V. (1977). Drawing of electrically conductive wire – by connection of draw current source pole to deformation zone to facilitate drawing at high rates based on electro-plastic effect. Patent SU584934-A.

80. Spitsyn, V. I., Stashenko, V. I. & Troitskii, O. A. (1981). Metal foil pressure treatment – with specified pulse rate of current passing through blank to speed up process. Patent SU829241-B.

81. Stolyarov, V. V., Ugurchiev, U. Kh., Gurtovaya, I. B. & Prokoshkin, S. D. (2008). Increase in the deformability of coarse-grained TiNi alloy rolled with superimposition of pulse current. *Metal Sci. Heat Treat.*, 50, 132.

82. Kuznetsov, V. A., Kuznetsova, E. S., Gromov, V. E. & Kosinov, D. A. (2018). Sistema avtomaticheskogo upravleniya protsessom elektrostimulirovannogo volocheniya. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 61(8), 613–619. (In Russ.).

83. Zhmakin, Yu. D., Zagulyayev, D. V., Kononov, S. V., Gromov, V. E. & Kuznetsov, V. A. (2011). Chastotno-reguliruyemyy generator moshchnykh tokovykh impul'sov s obratnoy svyaz'yu po amplitude. *Promyshlennaya energetika*, (1), 28–31. (In Russ.).

84. Zhmakin, Yu. D., Zagulyayev, D. V., Kononov, S. V., Gromov, V. E. & Kuznetsov, V. A. (2010). Generator moshchnykh tokovykh impul'sov na zapirayemykh tiristorakh. *Promyshlennaya energetika*, (6), 39–41. (In Russ.).

85. Ruskiewicz, B. J., Grimm, T., Ragai, I., Mears, L. & Roth, J. T. (2017). A review of electrically-assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(11), 110801(1-15).

86. Lv, Z., Zhou, Y., Zhan, L., Zang, Z., Zhou, B. & Qin, S. (2021). Electrically assisted deep drawing on high-strength steel sheet. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(3–4), 763–773.

87. Gerstein, G., Körkemeyer, F., Dalinger, A., Zaefferer, S. & Maier, H. J. (2019). Anomalous twinning in AZ31 magnesium alloy during electrically assisted forming. *Materials Letters*, 255, 126516.

88. Kaminskiy, P. P. (2015). Neobratimaya deformatsiya kristallov kak strukturnoye prevrashcheniye, initsiiruyemoye izmeneniyem mezhatomnogo vzaimodeystviya: dis. ... dokt. fiz.-mat. nauk. Tomsk: IFPM SO RAN. P. 243. (In Russ.).

89. Gromov, V. E., Zuyev, L. B., Kozlov, E. V. & Tsellermayer, V. Ya. (1996). Elektrostimulirovannaya plastichnost' metallov i spлавov. M.: Nedra. P. 293. (In Russ.).

90. Sarychev, V. D., Gagarin, A. Yu., Nevskiy, S. A. & Granovskiy, A. Yu. (2019). Modelirovaniye vozdeystviya elektricheskogo toka na plasticheskuyu deformatsiyu materialov. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 16(3), 315–322. (In Russ.).

#### Information about the authors

D. U. Abdullina – Junior Researcher, Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Center.

Yu. V. Bebikhov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department «Electric power engineering and automation of industrial production», Polytechnic Institute (branch) in Mirny, North-Eastern Federal University.

P. S. Tatarinov – Senior Lecturer of the Department «Electric Power Engineering and Automation of Industrial Production», Polytechnic Institute (branch) in Mirny, North-Eastern Federal University.

S. V. Dmitriev – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Laboratory «Nonlinear Dynamics of Molecules and Crystals», Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Center.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 13.06.2023; одобрена после рецензирования 24.07.2023; принята к публикации 07.08.2023.

The article was received by the editorial board on 13 June 23; approved after reviewing 24 July 23; accepted for publication 07 Aug. 23.